Guía de Estudio Detallada: CAPÍTULO 16 - Sonido y Oído

Este capítulo se enfoca en las **ondas sonoras**, que son **ondas longitudinales en un medio** (generalmente aire), y su **percepción por el oído humano**. Explora sus propiedades físicas y cómo estas se relacionan con lo que escuchamos.

Objetivos de Aprendizaje

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

- Cómo describir una onda sonora en términos de **desplazamientos de partículas** o **fluctuaciones de presión**.
- Cómo calcular la **rapidez de las ondas sonoras** en diferentes materiales.
- Cómo determinar la **intensidad de una onda sonora**.
- Qué determina la **frecuencia del sonido** producido por un órgano o una flauta.
- Cómo ocurre la **resonancia en los instrumentos musicales**.
- Qué sucede cuando se **traslapan las ondas sonoras** de diferentes fuentes.
- Cómo describir lo que ocurre cuando se **combinan dos ondas sonoras de frecuencias ligeramente diferentes**.
- Por qué el **tono de una sirena cambia** conforme se va alejando (Efecto Doppler).

16.1 Ondas Sonoras

- **Definición de Sonido**: El sonido es una **onda longitudinal en un medio**. Puede viajar a través de gases, líquidos o sólidos.
- **Descripción de Ondas Sonoras**:
    - **Desplazamiento ($y(x, t)$)**: Representa el desplazamiento instantáneo de una partícula en el medio respecto a su posición de equilibrio. La **amplitud A** (o amplitud de desplazamiento) es el desplazamiento máximo.
    - **Fluctuaciones de Presión ($p(x, t)$)**: Generalmente es una descripción más adecuada, ya que el oído es sensible principalmente a los

cambios de presión. $p(x, t)$ es la variación de presión respecto a la presión atmosférica normal.

- Relación entre Amplitud de Presión y Desplazamiento:
  - La **amplitud de presión ($p_{máx}$)** es la variación máxima de presión.
  - Para una onda sonora sinusoidal, $p_{máx} = BkA$.
    - B es el módulo volumétrico del medio.
    - k es el número de onda ($k = 2\pi / \lambda$ o $k = \omega / v$).
  - **Fase**: El desplazamiento ($y(x, t)$) y la variación de presión ($p(x, t)$) están **desfasados un cuarto de ciclo**. Las compresiones (máxima presión) y expansiones (mínima presión) son puntos de desplazamiento cero.
- Rango de Frecuencias:
  - **Gama audible**: 20 a 20,000 Hz para el oído humano.
  - **Ultrasonido**: Frecuencias mayores que 20,000 Hz.
  - **Infrasonido**: Frecuencias menores que 20 Hz.
- Percepción Humana del Sonido:
  - **Volumen**: Cuanto mayor sea la **amplitud de presión**, mayor será el volumen percibido. La sensibilidad del oído varía con la frecuencia.
  - **Tono**: Principalmente determinado por la **frecuencia**. Frecuencias más altas corresponden a tonos más agudos. La amplitud de presión también puede influir ligeramente.
  - **Timbre (Color de Tono o Calidad)**: Diferencia entre sonidos con la misma frecuencia fundamental pero diferente **contenido armónico**. Los sonidos musicales son combinaciones de una frecuencia fundamental y sus armónicos (múltiplos enteros de la fundamental).
  - **Ataque y Decaimiento**: El comportamiento al principio y al final del tono también influye en la calidad del sonido.
  - **Ruido**: Combinación de **todas las frecuencias**, no solo múltiplos enteros de una fundamental.

16.2 Rapidez de las Ondas Sonoras

- **Fórmula General**: La rapidez de una onda mecánica (v) depende de un término de **fuerza de restitución** y un término de **inercia**.
- **Rapidez en Fluidos (líquidos o gases)**:
  - $v = \sqrt{(B/\rho)}$
    - B es el **módulo volumétrico** (resistencia a la compresión).
    - ρ es la **densidad** del medio.
- **Rapidez en Varillas Sólidas**:
  - $v = \sqrt{(Y/\rho)}$
    - Y es el **módulo de Young** (resistencia a la deformación longitudinal).
    - Esta fórmula es específica para varillas donde los lados pueden expandirse; no es válida para sólidos voluminosos.
- **Rapidez en Gases Ideales**:
  - $v = \sqrt{(\gamma RT/M)}$
    - γ (gamma) es la **razón de capacidades caloríficas** (adimensional).
    - R es la **constante de los gases** (8.314 J/mol·K).
    - T es la **temperatura absoluta** en Kelvin ($T_K = T_C + 273.15$).
    - M es la **masa molar** del gas.
  - La rapidez del sonido en un gas depende fundamentalmente de la **temperatura**, no de la presión.
- **Observaciones Importantes**:
  - El sonido viaja **más rápido en líquidos y sólidos que en gases**.
  - La rapidez de la onda y la velocidad de las partículas del medio **no son lo mismo**.

16.3 Intensidad del Sonido

- **Definición de Intensidad (I)**: Es la **rapidez media con que la onda transporta energía por unidad de área** a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación.
- **Relaciones de Intensidad**:
  - En términos de **amplitud de desplazamiento** A: $I = \frac{1}{2}\sqrt{(\rho B)}\omega^2A^2$ o $I = \frac{1}{2}BvkA^2$.

    - En términos de **amplitud de presión** pmáx: $I = p_{máx}^2 / (2\rho v)$ o $I = p_{máx}^2 / (2\sqrt{(\rho B)})$.
    - Ondas con la misma intensidad pero diferente frecuencia tienen diferente amplitud de desplazamiento (A), pero la **misma amplitud de presión (pmáx)**.
- **Ley del Cuadrado Inverso**: Para una fuente de sonido que emite en todas direcciones por igual, la intensidad **disminuye con el cuadrado de la distancia** ($I \propto 1/r^2$). Esto no es válido en interiores debido a reflexiones.
- **Nivel de Intensidad de Sonido (β) - Escala de Decibeles**:
    - El oído humano es sensible a una amplia gama de intensidades, por lo que se usa una escala logarítmica.
    - $\beta = (10\ dB) \log(I/I_0)$.
        - I_0 es una intensidad de referencia: $10^{-12}\ W/m^2$ (aproximadamente el umbral de audición humana a 1000 Hz).
        - La unidad es el **decibel (dB)**.
    - Un aumento de 10 dB en el nivel de intensidad del sonido corresponde a un factor de 10 en la intensidad.
    - Un aumento de 3 dB en el nivel de intensidad del sonido corresponde a un factor de 2 en la intensidad.

16.4 Ondas Sonoras Estacionarias y Modos Normales

- **Formación**: Resultan de la **superposición de ondas sonoras que viajan en direcciones opuestas** y se reflejan en los extremos de un tubo.
- **Nodos y Antinodos**:
    - **Nodo de Desplazamiento (N)**: Puntos donde las partículas del fluido tienen **cero desplazamiento**.
    - **Antinodo de Desplazamiento (A)**: Puntos donde las partículas del fluido oscilan con **amplitud máxima**.
    - **Nodo de Presión**: Puntos donde la presión y la densidad **no varían**.
    - **Antinodo de Presión**: Puntos donde las variaciones de presión y densidad son **máximas**.

    - **Relación**: Un nodo de presión siempre es un antinodo de desplazamiento, y un antinodo de presión siempre es un nodo de desplazamiento.
- **Condiciones de Contorno en Tubos**:
    - **Extremo Cerrado**: Siempre es un **nodo de desplazamiento** y un **antinodo de presión**.
    - **Extremo Abierto**: Siempre es un **antinodo de desplazamiento** y un **nodo de presión**.
- **Modos Normales en Tubos de Órgano e Instrumentos de Viento**:
    - **Tubos Abiertos (ambos extremos abiertos)**:
        - Ambos extremos son antinodos de desplazamiento.
        - Las longitudes de onda posibles son $\lambda_n = 2L/n$.
        - Las **frecuencias de los modos normales** son $f_n = nv / (2L)$, donde $n = 1, 2, 3,...$ (todos los armónicos posibles).
    - **Tubos Cerrados (un extremo cerrado, otro abierto)**:
        - El extremo cerrado es un nodo de desplazamiento; el abierto es un antinodo de desplazamiento.
        - Las longitudes de onda posibles son $\lambda_n = 4L/n$.
        - Las **frecuencias de los modos normales** son $f_n = nv / (4L)$, donde $n = 1, 3, 5,...$ (solo armónicos impares posibles).
- **Efecto de la Temperatura**: Las frecuencias de los instrumentos de viento son proporcionales a la rapidez del sonido v, y v aumenta con la temperatura. Por lo tanto, el **tono de los instrumentos de viento aumenta con la temperatura**.

16.5 Resonancia y Sonido

- **Definición de Resonancia**: Ocurre cuando una **fuerza que varía periódicamente** se aplica a un sistema y su frecuencia es **cercana a una de las frecuencias de modo normal** del sistema. Esto produce una **respuesta máxima en la amplitud** de la oscilación forzada.
- **Ejemplos**: Empujar un columpio, el "sonido del océano" en un caracol, cuerdas de piano, y la rotura de una copa de cristal con la voz.

- **Oído Humano**: El canal auditivo actúa como un tubo cerrado, teniendo una resonancia en su frecuencia fundamental de aproximadamente 3440 Hz, lo que lo hace más sensible cerca de esta frecuencia.

16.6 Interferencia de Ondas

- **Definición**: Los fenómenos ondulatorios que se presentan cuando **dos o más ondas se traslapan en la misma región del espacio**.
- **Tipos de Interferencia**:
  - **Interferencia Constructiva**: Ocurre cuando las ondas llegan **en fase** (crestas con crestas, valles con valles). La **diferencia de las longitudes de trayectoria** es un **número entero de longitudes de onda** ($0,\ \lambda, 2\lambda, 3\lambda,\ldots$). La amplitud total es máxima.
  - **Interferencia Destructiva**: Ocurre cuando las ondas llegan **desfasadas medio ciclo** (una cresta con un valle). La **diferencia de las longitudes de trayectoria** es un **número semientero de longitudes de onda** ($\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2,\ldots$). La amplitud total es mínima o cero si las amplitudes son iguales.
- **Diferencia con Ondas Estacionarias**: En la interferencia de ondas viajeras, hay un **flujo neto de energía** desde las fuentes, a diferencia de las ondas estacionarias donde no hay flujo neto de energía. Además, en la interferencia destructiva de ondas viajeras, un punto puede ser un nodo de desplazamiento y un nodo de presión, mientras que en ondas estacionarias, un nodo de presión es un antinodo de desplazamiento y viceversa.
- **Aplicaciones**: Se utiliza para **controlar el ruido** mediante fuentes de sonido adicionales que interfieren destructivamente.

16.7 Pulsos

- **Fenómeno**: Ocurre cuando se combinan **dos ondas de la misma amplitud pero frecuencias ligeramente distintas**. La **amplitud de la onda resultante varía periódicamente**.

- **Percepción**: Las variaciones de amplitud causan variaciones de volumen llamadas **pulsos**.
- **Frecuencia del Pulso (fpulso)**: La frecuencia con que varía el volumen es la **diferencia entre las dos frecuencias**.
    - **fpulso = |fa - fb|**.
- **Aplicaciones**: **Afinación de instrumentos musicales** (cuando la frecuencia del pulso es de unos pocos Hz, se oye un "temblor" o pulso del tono). Sincronización de motores de avión.

16.8 Efecto Doppler

- **Definición**: Es el **cambio en la frecuencia del sonido** que escucha un receptor cuando hay **movimiento relativo entre la fuente de sonido y el receptor**, con respecto al medio.
- **Convención de Signos**: Se define la **dirección positiva del receptor (L) a la fuente (S)**.
    - Velocidad en esta dirección es positiva; en la dirección opuesta, negativa.
    - Todas las velocidades (v_S y v_L) se miden **relativas al medio** (ej. aire).
- **Fórmula General**:
    - **$f_L = ((v + v_L) / (v + v_S)) * f_S$**
        - f_L: frecuencia percibida por el receptor.
        - f_S: frecuencia emitida por la fuente.
        - v: rapidez del sonido en el medio (siempre positiva).
        - v_L: velocidad del receptor (positiva si se mueve de L a S, negativa si de S a L).
        - v_S: velocidad de la fuente (positiva si se mueve de L a S, negativa si de S a L).
- **Interpretación**:
    - Si la fuente y el receptor se **acercan**, $f_L > f_S$ (tono más agudo).
    - Si la fuente y el receptor se **alejan**, $f_L < f_S$ (tono más grave).
    - Si no hay movimiento relativo ($v_L = v_S$), $f_L = f_S$.

- **Doble Desplazamiento Doppler**: Ocurre cuando una onda se refleja en una superficie (ej. radar, sonar). Se resuelve en dos pasos: primero, la superficie actúa como receptor; segundo, la superficie actúa como fuente que emite la frecuencia recibida.
- **Efecto Doppler para Ondas Electromagnéticas (Luz, Radio)**:
    - No hay un medio de referencia; solo importa la **velocidad relativa entre fuente y receptor**.
    - La rapidez de la onda es la **rapidez de la luz** c.
    - Fórmula (v es la velocidad con la que la fuente se aleja del receptor): $fR = \sqrt{((c - v) / (c + v))} * fS$.

16.9 Ondas de Choque

- **Formación**: Ocurre cuando una fuente de sonido se mueve con una **rapidez** vS **mayor que la rapidez del sonido** v en el medio (movimiento supersónico).
- **La Barrera del Sonido**: Conforme vS se acerca a v, la longitud de onda de las ondas enfrente de la fuente se acerca a cero, y las crestas de la onda se apilan. Esto genera un aumento considerable en el arrastre aerodinámico.
- **Cono de Onda de Choque**: Las crestas circulares emitidas por la fuente interfieren constructivamente a lo largo de una línea que forma un cono alrededor de la dirección del movimiento de la fuente.
    - El **ángulo** α **del cono** está dado por $\text{sen } \alpha = v / vS$.
    - La razón vS/v se llama **número Mach**.
- **Estampido Sónico**: Es el sonido causado por la **llegada de la onda de choque** a un observador. Los objetos supersónicos producen una onda de choque continua, no solo al "romper la barrera del sonido".
- **Aplicaciones**: **Litotricia extracorpórea por onda de choque**, que usa ondas de choque para desintegrar cálculos renales o biliares.

- Glosario de Términos Clave:
- • Amplitud de desplazamiento (A): El desplazamiento máximo de una partícula en el medio con respecto a su posición de equilibrio en una onda sonora.
- • Amplitud de presión (p{máx}): La variación máxima de presión con respecto a la presión atmosférica normal en una onda sonora.
- • Armónico: En una onda estacionaria, una frecuencia de vibración que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
- • Efecto Doppler: El cambio en la frecuencia de una onda percibida por un receptor debido al movimiento relativo entre la fuente de la onda y el receptor.
- • Frecuencia del pulso (f{pulso}): La frecuencia con la que varía el volumen cuando dos ondas sonoras de frecuencias ligeramente diferentes se combinan; es igual a la diferencia absoluta entre las dos frecuencias.
- • Gama audible: El rango de frecuencias de ondas sonoras que el oído humano puede percibir, típicamente de 20 Hz a 20,000 Hz.
- • Infrasónico: Ondas sonoras con frecuencias por debajo del límite inferior de la gama audible (menos de 20 Hz).
- • Intensidad (I): La rapidez media con que una onda sonora transporta energía por unidad de área a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación.
- • Módulo de Young (Y): Una medida de la rigidez de un material sólido, relacionada con su resistencia a la deformación bajo tensión o compresión longitudinal.
- • Módulo volumétrico (B): Una medida de la resistencia de un fluido (o sólido) a la compresión; cuanto mayor sea B, menos compresible es el material.
- • Nivel de intensidad de sonido (beta): Una medida logarítmica de la intensidad de sonido, expresada en decibeles (dB), en relación con una intensidad de referencia (I0 = 10^{-12} { W/m}^2).
- • Nodo de desplazamiento (N): Un punto en una onda sonora estacionaria donde las partículas del medio tienen cero desplazamiento. Corresponde a un antinodo de presión.

- • Nodo de presión: Un punto en una onda sonora estacionaria donde la variación de presión y densidad es mínima (cero). Corresponde a un antinodo de desplazamiento.
- • Número Mach: La relación entre la rapidez de una fuente (ej. un avión) y la rapidez del sonido en el medio (vS/v).
- • Onda de choque: Una cresta de onda de amplitud muy grande formada cuando una fuente de sonido se mueve a una rapidez mayor que la del sonido (supersónica).
- • Onda longitudinal: Una onda en la que el desplazamiento de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Las ondas sonoras son longitudinales.
- • Pulsos: Fluctuaciones periódicas en la amplitud o intensidad de una onda resultante de la superposición de dos ondas de frecuencias ligeramente diferentes.
- • Resonancia: El fenómeno donde la amplitud de la oscilación forzada de un sistema es máxima cuando la frecuencia de la fuerza impulsora es igual o cercana a una de las frecuencias de modo normal del sistema.
- • Sonido musical: Sonidos que consisten en combinaciones de ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental, lo que les da un tono definido.
- • Timbre (color de tono o calidad): La característica de un sonido que permite al oyente distinguir entre diferentes tipos de producción de sonido, incluso si tienen la misma frecuencia fundamental y amplitud. Determinado por el contenido armónico y el comportamiento de ataque y decaimiento.
- • Tono: La característica del sonido que permite clasificarlo como "agudo" o "grave", determinada principalmente por la frecuencia.
- • Tubo abierto: Un tubo de órgano o instrumento de viento abierto en ambos extremos, que tiene antinodos de desplazamiento en sus extremos.
- • Tubo cerrado: Un tubo de órgano o instrumento de viento cerrado en un extremo y abierto en el otro, que tiene un nodo de desplazamiento en el extremo cerrado y un antinodo de desplazamiento en el extremo abierto.
- • Ultrasonido: Ondas sonoras con frecuencias por encima del límite superior de la gama audible (más de 20,000 Hz).